

## Моделирование времени до пробоя пористого диэлектрика в системе металлизации интегральных схем современного уровня

Орлов А.А.<sup>1,2</sup>, Резванов А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО НИИМЭ, г. Зеленоград; <sup>2</sup>МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный

### Введение

Согласно международной дорожной карте для устройств и систем (International Roadmap for Devices and Systems – IRDS 2020), временной пробой диэлектрика (*Time-Dependent Dielectric Breakdown – TDDDB*) является одной из основных проблем, приводящих к отказу сверхбольших интегральных схем (СБИС) [1]. Временной пробой диэлектрика это механизм отказа в системе металлизации, при котором пробой диэлектрика – результат длительного воздействия электрического поля. Причиной *TDDDB* предполагается формирование проводящего слоя ловушек в диэлектрике, соединяющего две близлежащие металлические линии (электрода), что впоследствии приводит к существенному увеличению тока. Считается, что ловушки (центры локализации туннелирующих электронов из электродов) формируются за счет диффузии ионов металлического барьера (например, *Ta/TaN*) [2].

### Моделирование временного пробоя диэлектрика

Локальная проводимость между медными линиями определяется вероятностью прыжка электрона между ближайшими центрами, которая, в свою очередь, определяется концентрацией ионов металлического барьера  $C(x,y,t)$  в рассматриваемом слое [3]. При этом из-за разницы в расстоянии между центрами, полное сопротивление проводящего пути определяется **минимумом** указанной выше концентрации (схема указана на рисунке 1).

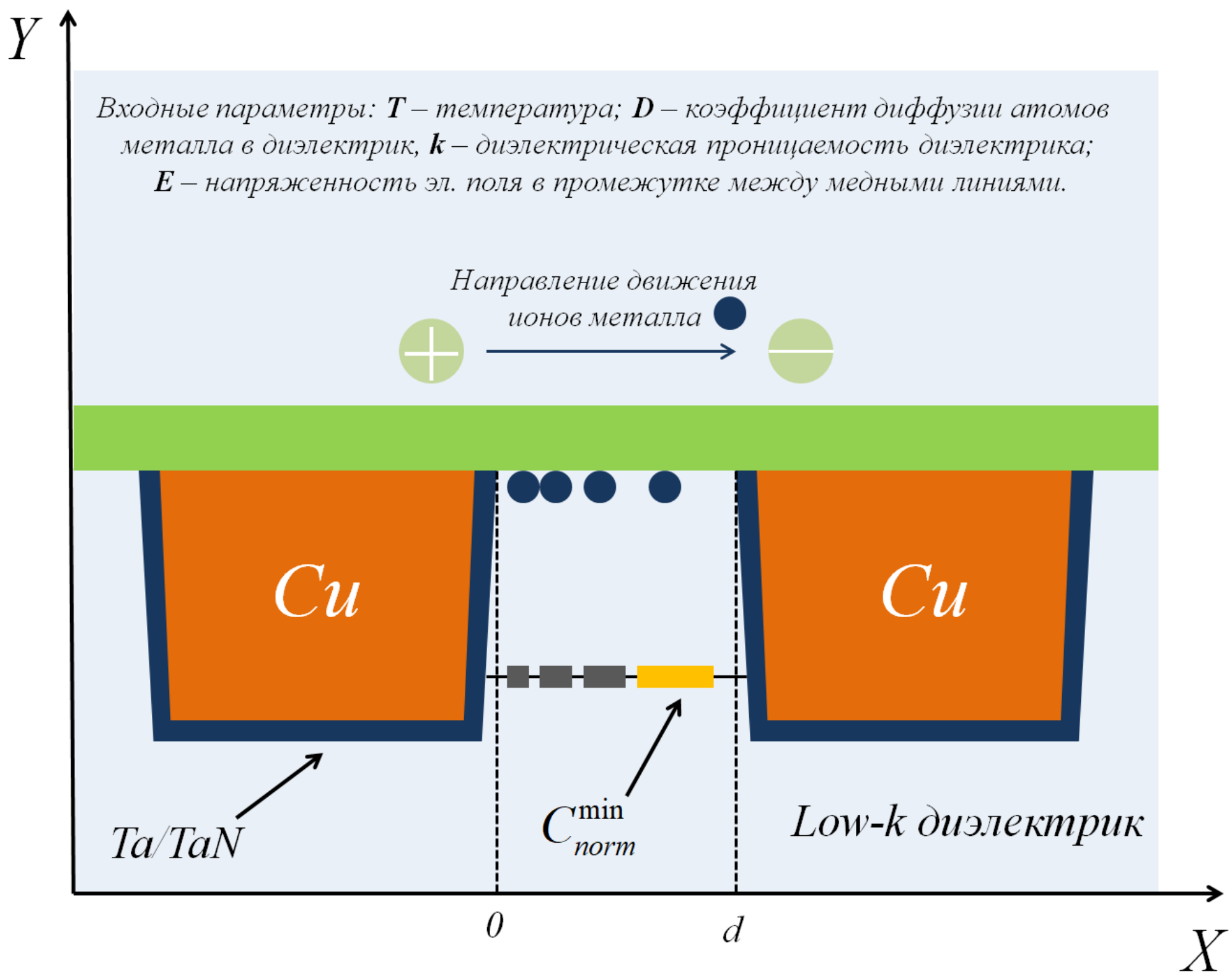


Рисунок 1. Схематическое изображение физических процессов в моделируемой структуре, представляющей собой две близлежащие медные линии с диэлектриком между ними [4].

Нормированную минимальную концентрацию ионов металла можно определить, исходя из уравнения диффузии и дрейфа ионов в электрическом поле (1) и граничными условиями на электродах (2) [5].

$$\frac{\partial C_{norm}}{\partial t} = D \Delta C_{norm} - q D E \nabla C_{norm} / k_B T; \quad (1)$$

$$C_{norm}(x=0) = C_{norm}(x=d) = 1. \quad (2)$$

Представленные на рисунке 2 расчеты нормированной концентрации ионов металла между двумя близлежащими медными линиями в зависимости от времени проводились в программе *COMSOL Multiphysics®* методом конечных элементов (значения входных параметров моделирования показаны вверху рисунка 2) [3]. Исходя из графика зависимости нормированной концентрации от времени, можно определить время до пробоя диэлектрика (*Time to Failure – TTF*) при условии что **нормированная концентрация  $\approx 1$** . (область определения *TTF* указана на рисунке 3). В данном случае значение *TTF* составляет примерно  $1.25 \times 10^8$  секунд ( $\approx 3.96$  лет).

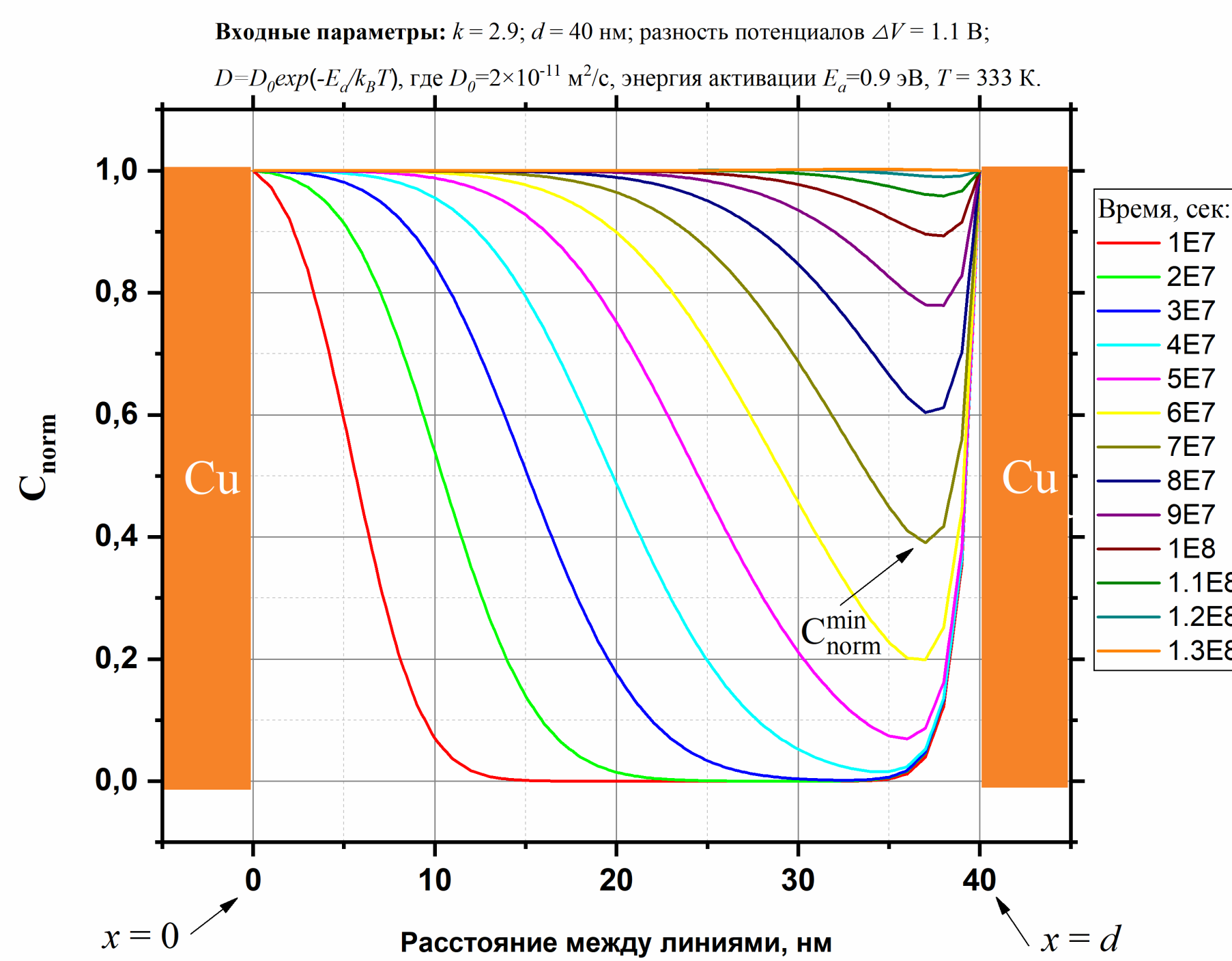


Рисунок 2. Распределение концентрации ионов металлического барьера между двумя близлежащими медными линиями.

Требуемые параметры для моделирования извлекаются из экспериментальных данных диффузии ионов металлического барьера в диэлектрик [6].

На рисунке 4 представлена зависимость *TTF* от расстояния  $d$  между двумя близлежащими медными линиями при постоянных значениях коэффициента диффузии  $D$ , температуры  $T$  и диэлектрической проницаемости  $k$ .

В данной работе рассматривается случай постоянной разности потенциалов между двумя линиями (или, эквивалентно, постоянное электрическое поле), который охватывает следующие случаи питания линий: линия питания – заземленная линия; линия питания – периодический сигнал; периодический сигнал – периодический сигнал. Случай заземленная линия – периодический сигнал планируется рассмотреть в дальнейших исследованиях.

На рисунке 5 представлена зависимость *TTF* от напряжения питания линии  $V_{DD}$  (другая линия заземлена) при постоянных значениях коэффициента диффузии  $D$ , температуры  $T$  и диэлектрической проницаемости  $k$ .

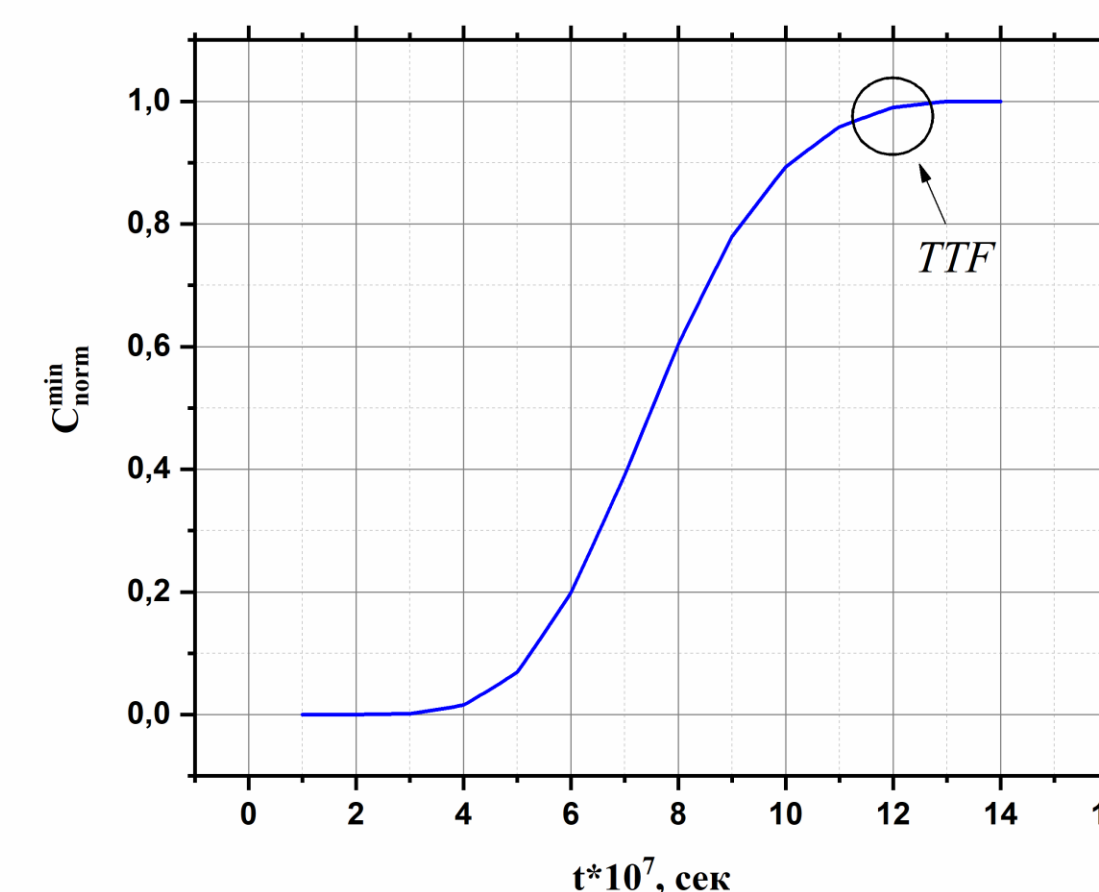


Рисунок 3. Определение времени до пробоя (*TTF*) пористого диэлектрика.

Рисунок 4. Зависимость *TTF* от расстояния между линиями (при постоянных значениях  $D$ ,  $T$  и  $k$ ).

Аппроксимация зависимости описывается выражением:

$$TTF = A_1 \exp(d/t_1) + A_2 \exp(d/t_2) + TTF_0. \quad (3)$$

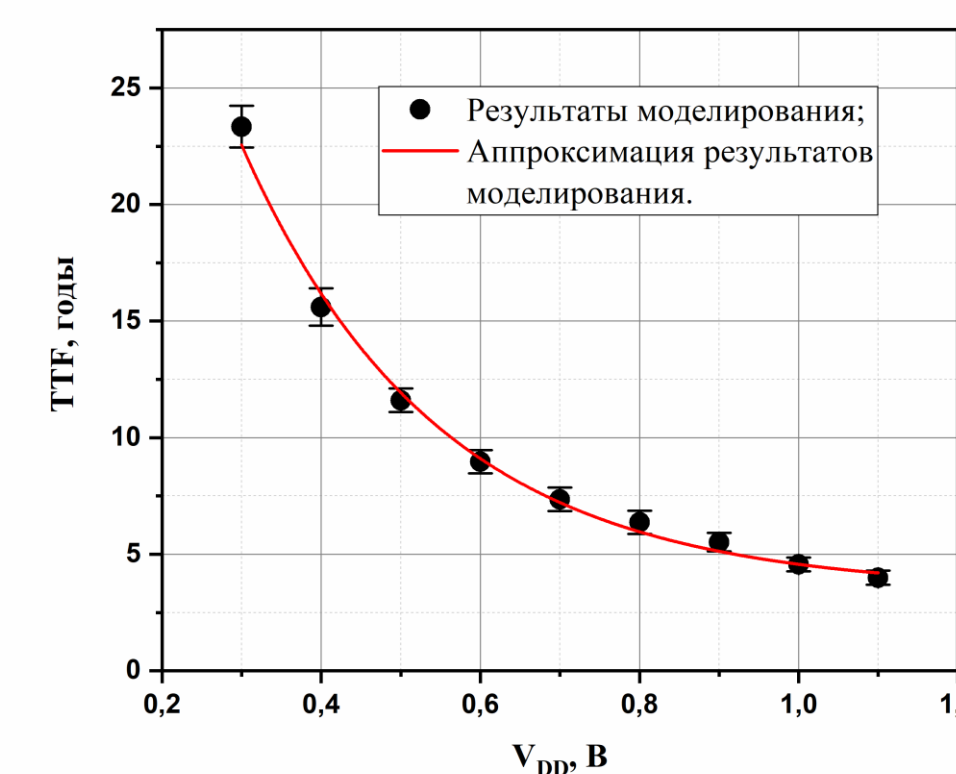
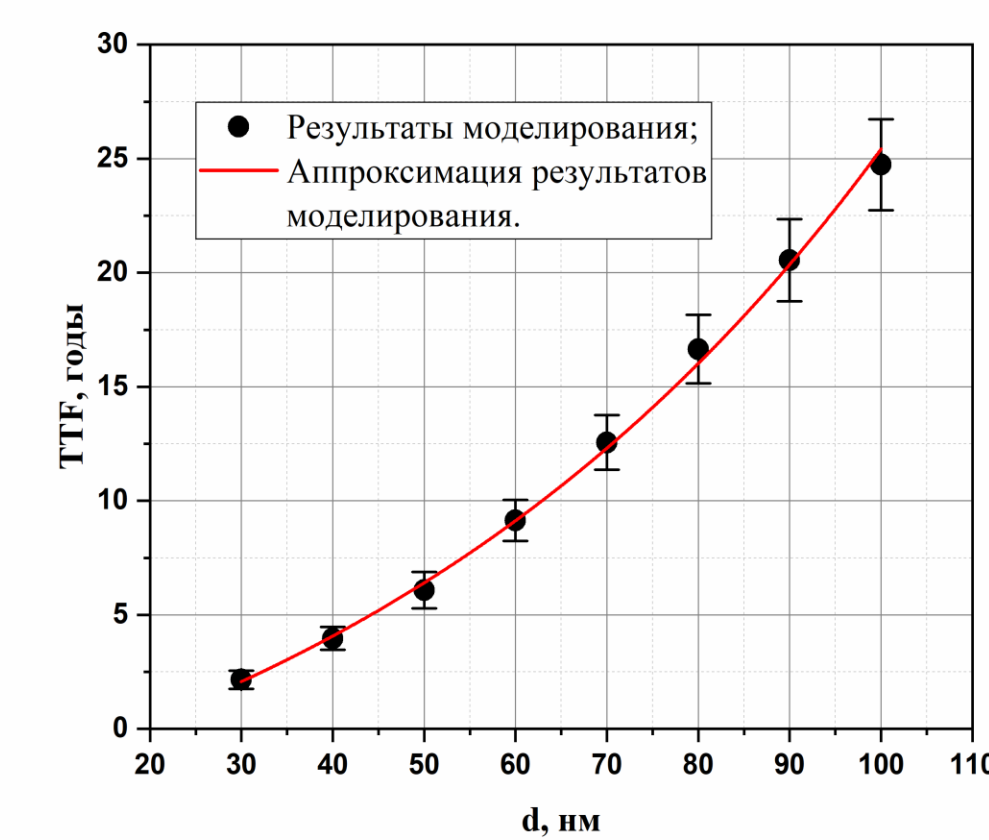


Рисунок 5. Зависимость *TTF* от напряжения питания линии  $V_{DD}$  (другая линия заземлена) при постоянных значениях  $D$ ,  $T$  и  $k$ .

Аппроксимация зависимости описывается выражением:

$$TTF = A_1 \exp(V_{DD}/t_1) + TTF_0. \quad (4)$$

### Выводы

Таким образом, в работе представлен метод оценки времени до пробоя пористого диэлектрика в элементах СБИС на основании извлечения из экспериментальных данных коэффициента диффузии и расчетов по математической модели распределения ионов металлического барьера в диэлектрике между двумя близлежащими медными линиями. Дополнительно, в работе произведены расчеты зависимости *TTF* от расстояния между двумя близлежащими медными линиями, а также в зависимости от напряжения питания линии (другая линия заземлена). Получено, что указанные зависимости носят экспоненциальный характер (выражения 3 и 4). В дальнейших исследованиях планируется рассмотреть изменение *TTF* при подаче периодического сигнала на линию (другая линия заземлена), а также зависимость *TTF* от геометрии топологии интегральной схемы.

### Литература

- 1) *International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) Interconnect*, 2020 Edition. [Online]. Available: <https://irds.ieee.org/editions/2020>
- 2) Tan T.L., Gan C.L., Du A.Y., Cheng C.K. *Effect of Ta migration from sidewall barrier on leakage current in Cu/SiOCH low-k dielectrics* // Journal of Applied Physics. – 2009. – V. 106. – № 4. – 043517.
- 3) Huang X., Sukharev V., Qi Z., Kim T., Tan S. X.-D. *Physics-based full-chip TDDDB assessment for BEOL interconnects* // Proceedings of the 53rd Annual Design Automation Conference 2016 - DAC '16.
- 4) Валеев А. С., Красников Г. Я. *Технология изготовления внутрикристалльных и межкристалльных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития)* // Микроэлектроника, 2015. – Т. 44. – № 3. – С. 180-201.
- 5) Groove A.S. *Physics and Technology of Semiconductor Devices*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 1967.
- 6) Kuo Y.-L., Lee H.-H., Lee C., Lin J.-C., Shue S.-L., Liang M.-S., Daniels B. J. *Diffusion of Copper in Titanium Zirconium Nitride Thin Films* // Electrochemical and Solid-State Letters. – 2004. – V. 7. – № 3. – C35.